



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

LAJITELLUN LENTOTUHKAN KÄYTTÖ BETONISSA

TEKIJÄ: Tuomo Paavola

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Rakennusalan työnjohdon koulutusohjelma	
Työn tekijä Tuomo Paavola	
Työn nimi Lajitellun lentotuhkan käyttö betonissa	
Päiväys 24.02.2013	Sivumäärä/Liitteet 28
Ohjaaja Lehtori Matti Mikkonen	
Toimeksiantaja CT Heikkinen Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli tutkia lajitellun lentotuhkan vaikutusta betonin ominaisuuksiin sekä miten paljon lajitellulla lentotuhkalla voi korvata sementtiä. Lentotuhkaa muodostuu kivihiilen poltossa lämpö- ja sähkövoimalaitoksissa. Lentotuhka kerätään sähkösuodattimilla savukaasuista ja sitä syntyy Suomessa vuosittain satojatuhansia tonneja. Lajittelematonta lentotuhkaa on käytetty betonissa jo pidemmän aikaa korvaamassa sementtiä. Tällä tutkimuksella haluttiin lisätietoa lajittelun vaikutuksesta lentotuhkan antamiin ominaisuuksiin betonissa.</p> <p>Tutkimuksessa verrattiin eri voimalaitosten lentotuhkia sekä kolmen eri raekoon vaikutusta betonin ominaisuuksiin. Sen lisäksi etsittiin oikeaa annostusta, jolla saadaan suurin hyöty lajitellusta lentotuhkasta. Kokeet sisältävät tuoreen betonin testauksesta leviämän ja kovettuneen betonin testauksesta puristuslujuuden. Koemassat valmistettiin kesäkuun ja joulukuun välisenä aikana vuonna 2012 CT Heikkinen Oy:n laboratoriossa.</p> <p>Opinnäytetyön tulosten mukaan lajittelulla lentotuhkalla voidaan korvata osa sementtiä betonin valmistuksessa. Sen lisäksi lajiteltu lentotuhka parantaa tuoreen betonin työstettävyysominaisuuksia. Lajitellulla lentotuhkalla korvattu sementti vähentää myös ympäristörasituksia, koska lajittelun ympäristörasitukset ovat minimaaliset verrattuna sementin valmistuksen aiheuttamiin rasituksiin.</p>	
Avainsanat Betoni, lentotuhka, lajittelu, puristuslujuus, UFFA	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Construction Management			
Author(s) Tuomo Paavola			
Title of Thesis Using sorted fly ash in concrete			
Date	24 February 2013	Pages/Appendices	28
Supervisor(s) Mr Matti Mikkonen Lecturer			
Client Organisation /Partners CT Heikkinen Ltd			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to study the effect of sorted fly ash on the properties of concrete and how much cement can be replaced by sorted fly ash in concrete. Fly ash is generated when coal is burned in thermal and electric power plants. Fly ash is captured with electrostatic precipitators from flue gases and hundreds of thousands of tons of fly ash is generated in Finland annually. Unsorted fly ash has been used for a long time to replace cement in concrete. The meaning of this study was to get more information about the effects of sorting in the properties of concrete caused by fly ash.</p> <p>Fly ashes from several power plants and the effect of three grain sizes on the properties of concretes were compared. The right dose, which gives the biggest benefit when using sorted fly ash was defined. The tests included a flow table test of fresh concrete and a compressive strength test of hardened concrete. The test concrete samples were made between June and December in 2012 in the laboratory of CT Heikkinen Ltd.</p> <p>The results of this thesis showed that sorted fly ash can replace a part of cement when making concrete. Additionally, sorted fly ash proved to improve the workability of fresh concrete. Using of concrete where a part of cement was replaced with sorted fly ash also cut down environmental stress because environmental stress of sorting was far more smaller than of manufacturing cement.</p>			
<p>Keywords</p> <p>Concrete, fly ash, sorting, compressive strength</p>			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO.....	5
2	BETONIN KOOSTUMUS.....	6
2.1	Runkoaine ja vesi.....	6
2.2	Sementti.....	7
2.3	Seosaineet.....	10
2.4	Lisäaineet.....	12
3	LAJITELTU LENTOTUHKKA.....	13
4	BETONIN TESTAUS.....	14
4.1	Testausohjelma.....	14
4.1.1	Koekappaleet.....	16
4.1.2	Laastikokeet.....	18
4.2	Tuoreen betonin kokeet.....	19
4.3	Kovettuneen betonin ja laastin kokeet.....	19
5	KOETULOKSET.....	21
5.1	Tuoreen betonin tulokset.....	21
5.2	Kovettuneen betonin tulokset.....	22
5.3	Kovettuneen laastin tulokset.....	23
6	KOETULOSTEN ARVIOINTI JA HAVAINNOT.....	25

LÄHTEET

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia sementin osittaista korvaamista lajitellulla lentotuhkalla betonin valmistuksessa. Lajiteltua lentotuhkaa ei käytetty tällä hetkellä betonin seosaineena Suomessa. Tällä hetkellä betonissa käytettävä lentotuhka on käsittelemätöntä, joka saadaan suoraan voimalaitoksilta. Tärkein kriteeri A luokan lentotuhkalle on sen hiilen ts. palamattomien määrä, joka ei saa ylittää 5 paino% (SFS 450-1). Lentotuhkan rake-
käyrään ei valmistajan puolelta oteta muuta kantaa kuin mitä standardi SFS 450-1 määrää. Siinä tarkastellaan vain 0,045 mm seulalle jäävän rakeen osuutta. Lajiteltaessa lentotuhka useampaan hienouteen ja valitsemalla sopivimmat, voidaan tehostaa sen vaikutusta betonissa. Lajittelun lisäksi lentotuhkan jalostaminen käsittää myös muita toimenpiteitä, joilla lentotuhkasta saadaan suurin hyöty käytettäessä sitä betonin seosaineena.

Aino Heikkinen-Mustonen on tutkinut luokitellun lentotuhkan vaikutusta betoniin jo 70-luvulla. Tämän kehitystyön tuloksena syntyi by 301 Betonin mikrosuhteitus. Myöhemmin asiaa on käsitelty EU-hankkeissa esim. (Microcon project no. 017620), joissa yhtenä osallistujana on ollut CT Heikkinen Oy. Vuonna 2004 CT Heikkinen Oy rakensi pilotti laitoksen, jossa lentotuhkaa jalostettiin teollisiin tarpeisiin. Jo näissä hankkeissa kävi ilmi lajitellun lentotuhkan hyödyt betonin seosaineena. Tällä opinnäytetyöllä on tarkoitus saada lisätietoa asiaan.

Työn tilaajana on CT Heikkinen Oy, jonka toimialana on betoniin liittyvä tuotekehitys ja laadunvalvonta. CT Heikkinen Oy:n erikoisosaamista on juuri mikroteknologian kehittäminen betoni- ja laastiteollisuuden tarpeisiin.

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia lajitellun lentotuhkan eri raekokojen vaikutusta betonin leviämään sekä puristuslujuuteen. Samalla selvitetään onko lajitellulla lentotuhkalla mahdollista saavuttaa vähemmällä sideainemäärällä sama puristuslujuus kuin vertailumassalla.

Opinnäytetyössä valmistetaan useita eri koemassoja joiden lajitellun lentotuhkan määrä vaihteli, kuten myös poistettu sementtimäärä. Kaikista koe-eristä tehdään leviämäkoje sekä koekappaleille puristuslujuuskoe. Puristuslujuuskokeita tehdään useina eri ajankohtina jokaisesta koe-erästä. Näin saadaan selville miten lajiteltu lentotuhka vaikuttaa betonin lujuudenkehitykseen eri ajankohdissa.

2 BETONIN KOOSTUMUS

Betoni on sementtiliiman ja kiviainesten muodostama keinotekoinen kivi, jolla on erinomainen puristuslujuus. Betoni koostuu sementistä, vedestä ja runkoaineesta sekä työstettävyyteen vaikuttavista seos- ja lisäaineista. Puristuslujuuteen eniten vaikuttava tekijä on sementin määrä, joka vaihtelee yleisesti käytetyissä betonilaaduissa 200–400 kg/m³. Runkoaineen on muodostuttava vähintään kahdesta eri kiviaineesta, vähintäänkin sorasta ja sepeleistä, sekä tarvittaessa filleristä.

2.1 Runkoaine ja vesi

Betonissa käytettävä runkoaine voi olla mitä tahansa riittävän kovaa ja sementin reaktioihin vaikuttamatonta ainetta. Se ei myöskään saa huonontaa betonin säilyvyysominaisuuksia. Koska sitä käytetään suhteellisen paljon tilavuusosuudesta, on sitä oltava riittävästi ja helposti saatavilla. Betonissa käytetään yleisesti kiviaineita, jotka voivat olla joko luonnon muovaamia tai murskattuja. Nykyään on yleistä, että käytetään näiden yhdistelmiä. Hienompi kiviaines on luonnon muovaamaa ja karkeammat kuten sepeli on murskattua. Kiviaineksen määrä on betonikuutiossa 65–80 % tilavuudesta. Näin ollen sen koostumuksella on suuri vaikutus betonin ominaisuuksiin. Kiviaines ei saa sisältää epäpuhtauksia, jotka vaikuttavat tuoreen tai kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Epäpuhtauksia ovat esim. humus, savi, öljy tai roskat myös sokeri voidaan lukea epäpuhtauksiin, koska se hidastaa sementin kovettumista. Myös kloridien määrää on rajoitettu, sillä kiviaineessa se ei saa ylittää 0,02 %. (Suomen betoniyhdistys ry 1999, 23.)

Betoniin käytettävän veden on oltava puhdasta eikä siinä saa olla sitoutumista haittaavia epäpuhtauksia. Voidaan todeta, että juomakelpoinen vesi kelpaa myös betonin valmistukseen. Kiviaines suhteitetaan, jotta sementin määrä voidaan pitää mahdollisimman pienenä. Runkoaineen oikea suhteitus on tärkeää tehdä oikein ja se on riippuvainen betonin tavoitelujuudesta ja maksimi raekoosta. Suhteituksessa runkoaine pyritään pakkaamaan mahdollisimman tiiviisti niin, että kiviaineksen väliin jää mahdollisimman vähän tyhjää tilaa, jonka sementtiliiman täytyy täyttää. (Suomen betoniyhdistys ry 1999, 101 – 115.)

2.2 Sementti

Sementti valmistetaan pääasiassa kalkkikivestä, jonka pääosana on kalsiumkarbonaatti (CaCO_3). Muita aineita ovat piidioksidi (SiO_2), rautaoksidi (Fe_2O_3) ja alumiinioksidi (AlO_3). Ne saadaan kalkkivilouhoksen sivukivestä tai muun teollisuuden tuotteista. Kalkkikivi ja muut komponentit jauhetaan kuulamylyssä hienoksi jauheeksi. Tämän jälkeen ne kuumennetaan kiertouunissa yli $+1\ 400\ ^\circ\text{C}$:een jossa ne sintraantuvat sementtiklinkkeriksi. (kuvio 1) Syntyneen portlandklinkkerin päämineraalit ovat trikalsiumsilikaatti (C_3S), dikalsiumsilikaatti (C_2S), trikalsium-aluminaatti (C_3A) ja kalsiumaluminaattiferriitti (C_4AF). Näiden neljän aineen keskinäisiä suhteita muuttamalla säädetään sementin lujuudenkehitystä. Toinen tärkeä seikka, joka vaikuttaa näihin ominaisuuksiin, on se miten hienoksi sementtiklinkkeri jauhetaan sen jälkeen kun se on kiertouunissa sintrattu. Jauhatus tapahtuu kuulamylyssä, jolloin lisättään vielä muita seosaineita joiden määrä ja laatu vaikuttavat sementin ominaisuuksiin, kuten sitoutumisaikaan ja loppulujuuteen. Muita seosaineita ovat kalkkikivi, massunikuona, silika, pozzolaanit, lentotuhka, poltettu liuske ja kipsi.

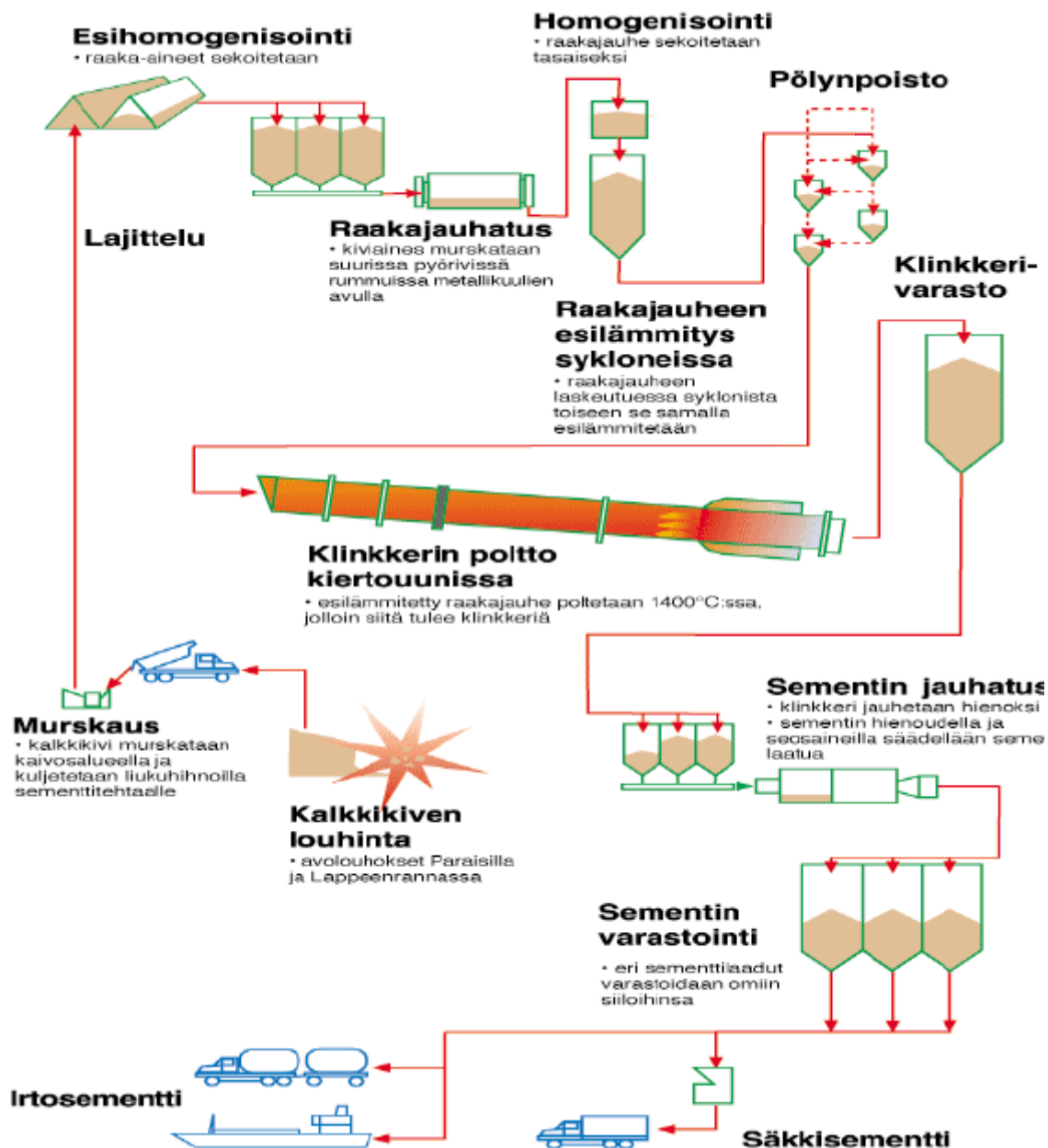
Finnsementti valmistaa seuraavanlaisia sementtilaatuja:

- Plussementti CEM II/B-M(S-LL) 42,5 N
- Yleissementti CEM II/A-M(S-LL) 42,5 N
- Rapidsementti CEM II/A-LL 42,5 R
- Pikaseimentti CEM I 52,5 R
- SR-Sementti CEM I 42,5 N
- Megasementti CEM I 42,5 R

Rakennussementtien merkintä koostu sementtilajista, josta selviää klinkkerin ja seosaineden suhde, lujuusluokasta sekä varhaislujuus tunnuksesta (N on normaali ja R on nopea). (Suomalainen sementti kirjanen) (taulukko 1.)

Taulukko 1. Suomessa sallittujen sementtien koostumusvaatimuksista. (Suomalainen sementti kirjanen)

Sementtilaji	Koostumusvaatimukset (%)					
	Klinkkeri	Kuona	Silika	Lentotuhka	Kalkkikivi	Muut
CEM I	95-100	-	-	-	-	0-5
CEM III/A-S	80-94	6-20	-	-	-	0-5
CEM III/B-S	65-79	21-35	-	-	-	0-5
CEM III/A-D	90-94	-	6-10	-	-	0-5
CEM III/A-V	80-94	-	-	6-20	-	0-5
CEM III/B-V	65-79	-	-	21-35	-	0-5
CEM III/A-LL	80-94	-	-	-	6-20	0-5
CEM III/A-M	80-94	6-20				0-5
CEM III/B-M	65-79	21-35				0-5
CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	0-5
CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	0-5

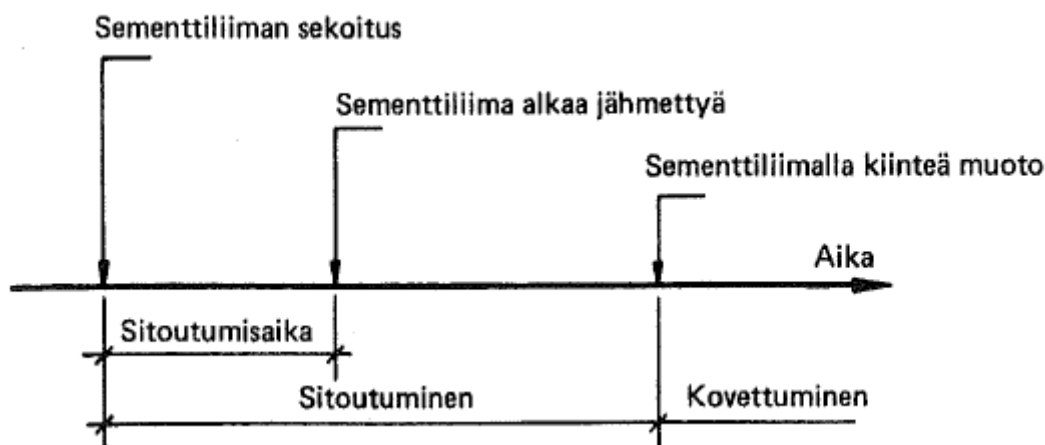


Kuvio 1. Kaaviokuva sementin valmistuksesta kuivamenetelmällä. (Suomalainen sementti kirjanen)

Finnsementin myymä valkosementti on laadultaan CEM I 52,5 R ja väriltään valkoista, sen käyttö on yleistä elementtiteollisuudessa, kun halutaan vaaleita pintoja. Finnsementti ei itse valmista kyseistä sementtiä vaan tuo sitä Tanskasta.

Sementissä veden kanssa ensin reagoivat aluminaattiyhdisteet, joilla ei ole suurtakaan merkitystä lujuuden kannalta, mutta ne ovat välttämättömiä varhaisreaktioiden ja sementin valmistuksen kannalta. Sementtiin lisätty kipsi hidastaa tätä reaktiota ja antaa massalle työaikaa. Sen sijaan ovat trikalsiumsilikaatti ja dikalsiumsilikaatti vastaavat sementin lujuuden kehityksestä. Ensin mainittu tuo varhaislujuutta ja jälkimmäinen loppulujuutta. Veden lisäyksen jälkeen sementtipasta pysyy aluksi notkeana, tätä aikaa kutsutaan työstettävyy-

ajaksi, mutta jonkin ajan kuluttua se alkaa hyytelöityä ja menettämään työstettävyytensä. Tässä vaiheessa sementtiliima alkaa sitoutumaan ja menettää plastisuuttaan ajanfunktiona. Sitoutumisen ja kovettumisen välistä rajaa on hankala tarkkaan määrittää, koska sitoutuminen on kovettumisen alkutapahtuma (kuvio 2). (Suomen betoniyhdistys ry 1999, 34,35.)



Kuvio 2. Sementtiliiman sitoutuminen ja kovettuminen (Suomen betoniyhdistys ry 1999, 37.)

Lujuudenkehitys alkaa, kun sitoutuminen loppuu, ja jatkuu niin kauan kuin hydratoitumiseen osallistumiskykyistä vettä ja sideaineita on tarjolla. Tästä syystä betonin vesisementtisuhde on olennainen tekijä sementin lujuudenkehityksessä. Vesisementtisuhde saadaan jakamalla betonissa oleva vesi sementtimäärällä. Teoreettinen minimimäärä on 25 % sementin painosta, joka on riittävä määrä hydrataatiolle. Koska sementtiin sitoutuu vettä myös huokosiin, tarvitaan vettä paljon enemmän, vähintäänkin 40 % sementin painosta. (Suomen betoniyhdistys ry 1999, 37.)

On olemassa muitakin sementtilaatuja kuin Suomessa yleisesti käytetty Portlandsementti. Aluminaattisementti valmistetaan kalkkikivestä ja bauxiitista, ja se on pääosin kalsiumaluminaattia sisältävä sementti. Sen käyttö kantavissa rakenteissa on kielletty, koska sen lopputuotteet eivät ole pysyviä. (Suomen betoniyhdistys ry 1999,37.) Kuivalaastiteollisuus käyttää sitä sen nopean lujuuden kehityksen takia monissa tasoitteissa ja kiinnityslaasteissa. Kalsiumsulfonaattialuminaatti-sementti (eng.Calcium sulfoaluminate cement) ei käytetä Suomessa juuri lainkaan, mutta esimerkiksi Kiinassa sen käyttö on yleisempää. Tämän sementtilaadun pääraaka-aine on ye´elimite (C_4A_3S) ja kalsiumsulfonaattialuminaattisementti valmistetaan polttamalla kuten muutkin sementit. Sen ympäristörasitukset ovat jonkin verran pienemmät kuin muilla sementeillä, johtuen matalammasta polttolämpötilasta ja vähäisemmästä kalkkikiven määrästä raaka-aineseoksessa. (Winnefeld. 2010) Kalsium-

sulfonaattialuminaatti-sementin lujuuden kehitys on erittäin nopea ja loppulujuus saavutetaan tunneissa.

2.3 Seosaineet

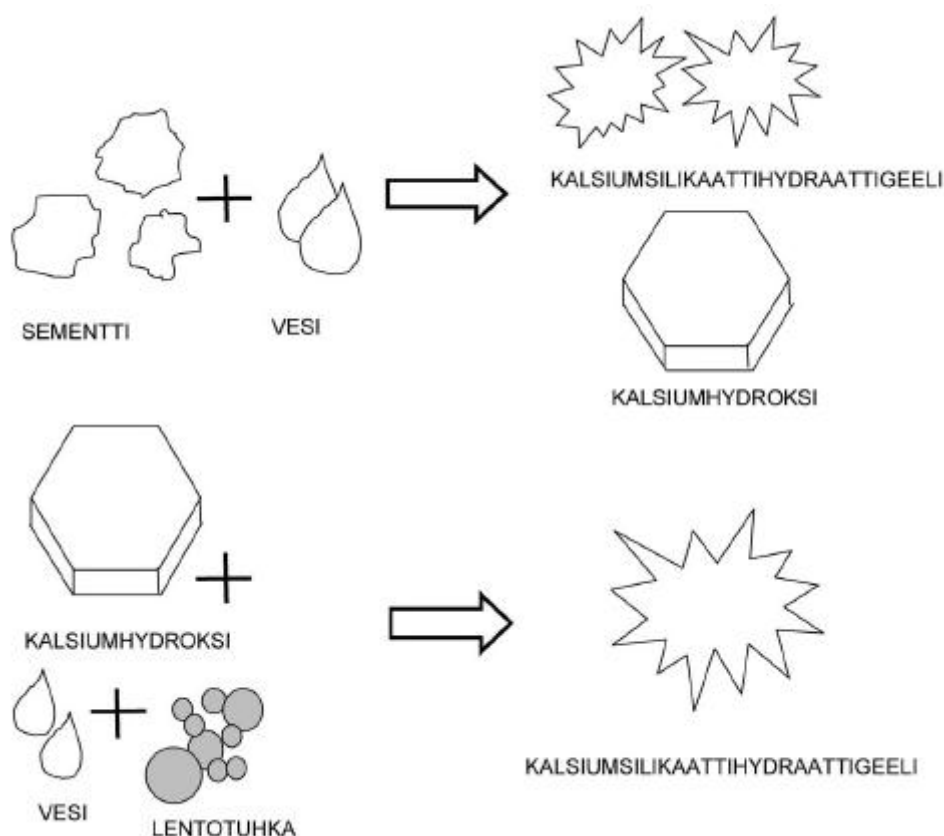
Masuunikuonajauhe valmistetaan jauhamalla raakaraudan valmistuksessa syntyneestä silikaattisulatteesta, toiselta nimeltään masuunikuonasta. Kuonajauheen reaktiivisuus riippuu sen hienoudesta sekä lasimaisuudesta. Lasimaisuus muodostuu, kun masuunikuona jäähdytetään nopeasti teollisessa prosessissa. Jauheen vedentarve on pieni ja se notkistaa betonia. Masuunikuonajauheella on piilevät hydrauliset ominaisuudet, eli se tarvitsee aktivaattorin rikkomaan sen lasimaisen rakenteen. Sementin hydrataatioreaktion tuloksena syntyy alkaleja ja sulfaatteja, jotka aktivoivat masuunikuonajauheen. Lujuudenkehitys masuunikuonalla on hitaampi kuin portlandsementillä, mutta monet muut edut tukevat sen käyttöä betonissa. Se parantaa betonin sulfaatin kestävyyttä ja sen hydrataatiolämpötila on alhaisempi kuin sementin. Näin ollen se on ihanteellinen massa massiivisiin siltavaluihin. Myös ympäristörasitukset ovat vähäisempiä kuin sementillä. (Suomen betoniyhdistys ry 1999 44.)

Silika on piiraudan ja piin valmistuksessa syntyvä erittäin hienojakoinen pozzolaani. Silika erotetaan savukaasuista ja sen raekoko on alle $1\mu\text{m}$. Se lisää lujuutta, tiiviyyttä, kemiallista kestävyyttä, koossapysyvyyttä ja vedenpitävyyttä. Silika lisää betonin veden tarvetta, ja näin ollen sen kanssa on aina käytettävä notkistinta. Runsaasti sementtiä sisältävissä korkealujuusbetoneissa silika huonontaa työstettävyyttä muuttaen massan kittimäiseksi. (Suomen betoniyhdistys ry 1999, 44.)

Lentotuhkaa syntyy hienoksi jauhetun kivihiilen poltossa sähkö- ja lämpövoimalaitoksissa. Lentotuhka erotetaan savukaasuista sähkösuodattimilla ja näin ollen sen laatu on riippuvainen polttoprosessin täydellisyydestä. Tästä johtuen se jaetaan A, B ja C luokkiin hehkutushäviön perusteella. Hehkutuskokeessa lentotuhkasta poltetaan epätäydellisen palamisen seurauksena jäänyt hiili pois ja mitataan sen määrä. Jos sen määrä, ts. hehkutushäviö, on enintään 5 % kuuluu tuhka A-luokkaan. B-luokalle arvo on 7 % ja C-luokalle 9 % (SFS 450-1). Yleensä betoniin käytetään vain A-luokan lentotuhkaa, koska liiallinen hiili huonontaa betonin ominaisuuksia. Lentotuhka, jonka maksimi raekoko on $150\mu\text{m}$, voi toimia betonissa runkoaineena ja/tai sideaineena. Lentotuhka on pozzolaaninen aine eli sen sideaineominaisuudet tarvitsevat aktivaattorin (kuvio 3.) Betonissa käytetyn sementin hydrataation reaktiotuotteena syntyvä kalsiumhydroksidi toimii aktivaattorina. (Suomen betoniyhdistys ry 2008, 15.) Aktiivisuuskerron, joka kertoo miten paljon lentotuhka pystyy korvaamaan sementtiä, on oltava vähintään 75 %. Tämä tulos saadaan standardissa SFS450-

1:ssa annetun testin perustella. Jos ohjeen mukaisesti korvataan sementtiä lentotuhkalla, sen 28 vrk lujuus pitää olla vakio olosuhteissa vähintään 75 % vertailulaastin lujuudesta, 91 vrk lujuus täytyy olla 85 %.

Lentotuhkan reaktio on hitaampi kuin sementin ja siksi sen käyttö betonissa alentaa alkulujuuksia, mutta toisaalta nostaa lopullisia puristuslujuus arvoja. Lämpötilan vaikutus lujuudenkehitykseen käytettäessä lentotuhkaa on merkittävä. Koska lentotuhkan sitoutuminen ja lujittuminen hidastuvat kylmässä sementtiä enemmän ja sen hydratoituessa vapautuva lämpö on vähäisempää, sitä ei tulisi käyttää kylmissä olosuhteissa. (Suomen betoniyhdistys ry 2008,15.)



Kuvio 3. Lentotuhkan ja sementin reaktiot betonissa. (Suomen betoniyhdistys ry 2008,15.)

On olemassa myös muita seosaineita, jotka toimivat pozzolaanisesti betonissa. Niiden käyttö on kuitenkin huomattavasti vähäisempää kuin edellä mainittujen. Muita seosaineita ovat metakaoliini, pozzosilika ja biosilika. Pozzosilika on lentotuhkasta vaahdottamalla ja jauhamalla jalostettu tuote ja biosilika on yleensä puutuhkaa. Metakaoliini on valmistettu polttamalla kaoliiniittiä 650–800 °C:ssa. (McCormik, 2007)

2.4 Lisäaineet

Lisäaineilla voidaan säädellä betonimassan ominaisuuksia, kuten notkeutta, sitoutumista, kovettumista ja kovettuneen betonin ominaisuuksia. Lisäaineet voidaan luokitella seuraavanlaisesti. (Suomen betoniyhdistys ry 1999, 47.):

- notkistimet
- huokostimet
- pakkasenkestävyyttä parantavat
- kiihdyttimet
- hidastimet
- tiivistysaineet
- muut lisäaineet.

Lisäaineiden käyttö vaatii huolellisuutta ja ennakkokokeita. Betonin valmistuksessa käytetyt välineet ja raaka-aineet vaikuttavat lisäaineiden käyttäytymiseen massassa. Sen lisäksi eri lisäaineet voivat reagoida keskenään ennalta arvaamattomasti. Eniten käytetyt lisäaineet betoniasemilla ovat huokostin, notkistin ja hidastin. Notkistimen tarkoitus on joko vähentää veden tarvetta, ja näin parantaa v/s-suhdetta, tai parantaa työstettävyyttä tekemällä betonista löysempää. Huokostimen tehtävä on lisätä betonimassan ilmamäärää niin, että sen suojahuokosten määrä on riittävä tai että se parantaa työstettävyyttä. Yleensä sitä käytetään lisäämään ilmaa, jota betonissa on normaalisti 1–2 %. Kun halutaan varmistaa betonin pakkasenkestävyys, on ilmaa oltava 4–8 tilavuus%. Hidastin siirtää sitoutumisen alkamista myöhäisemmäksi ja näin työaika pitenee. Syynä tähän voivat olla pitkät kuljetusmatkat tai työsaumojen vähennys tarve. (Suomen betoniyhdistys ry 1999, 46, 47.)

3 LAJITELTU LENTOTUHKKA

Lajiteltu lentotuhka on nimensä mukaisesti lentotuhkaa, joka on lajiteltu eri raekokoihin. Opinnäytetyössä käytettiin 3:a eri raekokoa ja 3:n eri voimalaitoksen tuhkaa. Hienompaa päättä lentotuhkajakeista kutsutaan UFFA:ksi. UFFA on lyhenne englanninkielisistä sanoista "ultra fine fly ash", joka tarkoittaa "erittäin hienoa lentotuhkaa". Raekoon tarkkaa rajaa, milloin lajiteltua lentotuhkaa kutsutaan UFFA:ksi, ei ole. Raekokoa tarkastellessa on huomioitava, että läpäisyarvot voivat vaihdella 95 %:n ja 98 %:n välillä valmistajasta mukaan. UFFA:n betonimassaa parantava vaikutus perustuu ilmeisesti kappaleiden pyöreään muotoon sekä suureen aktiiviseen pinta-alaan. Pinta-alaa määriteltäessä käytetään yleensä blaine-lukua. Se ilmaisee paljonko tietyllä määrällä ainetta on sen sisältämien hiukkasten yhteen laskettua pinta-alaa. Arvo voidaan antaa m^2/kg , jolloin UFFA:n blaine-luvuksi tulee n. 1 800 m^2/kg . Jos sitä vertaa Rapid-sementtiin, jolla vastaava luku on n. 500 m^2/kg , on ero merkittävä.

4 BETONIN TESTAUS

4.1 Testausohjelma

Testausohjelmaa suunniteltaessa pohdittiin mikä olisi oikea määrä lajiteltua lentotuhkaa joka betonireseptissä tuottaisi toisaalta parhaan hyödyn, sekä olisi tuotannollisesti ja taloudellisesti kannattavaa. Tässä apuna voitiin käyttää Aino Heikkinen-Mustosen aikaisempaa kokemusta hienojen seosaineiden käytöstä betonin valmistuksessa. Näiden tietojen perusteella päädyttiin käyttämään 3 – 10 %:n määrä kun korvattiin sementtiä betoniresepteissä.

Testausohjelma laadittiin Aino Heikkinen-Mustosen kanssa (taulukko 2), kuten myös suurin osa käytetyistä betoniresepteistä. Osa kokeista tehtiin eri SFS standardien mukaisten reseptien mukaisesti silloin, kun koe sitä vaati. Betonireseptiä haettaessa oli tarkoitus tehdä ”hyvää betonia” ja parantaa sitä lajitellulla lentotuhkalla. Kaikissa omissa resepteissä käytettiin Finnsementin Rapidsementti CEM II/A-LL 42,5 R sementtiä, kolmea kiviainesta, vettä ja notkistinta. Kokeissa osa sementistä korvattiin yleensä testattavalla lentotuhkalla. Vesi-sementti suhde vaihteli massojen kesken, koska yksi ominaisuus, jonka hyötyä pyrittiin selvittämään, oli vedentarpeen vähentyminen vertailu- ja koemassan välillä. Standardien mukaisesti tehtiin aktiivisuusindeksi koe SFS-EN 450-1 + A1 Fly ash for concrete. part 1 (taulukko 3) ja SFS-EN 934-2 Betonin, laastin ja injektointilaastin lisäaineet osa 2. Jälkimmäisestä testattiin kohta ”vedentarvetta vähentävät/nesteyttävät lisäaineet”.

Taulukko 2. Betonin testausohjelma

No	Tuhka%	UFFA	Karkea	Sementti	Sidea.yht.
1	0			360	360
2	3	A7		342	352,8
3	3	A5		342	352,8
4	3	C6		342	352,8
5	3	C1		342	352,8
6	3	B3		342	352,8
7	3	B4		342	352,8
8	10	A7		324	360
9	10	B3		324	360
10	10	C6		324	360
11	3		A7 K	342	352,8
12	3		B3 K	342	352,8
13	3		C6 K	342	352,8
14	5		A7 K	342	360
15	5		B3 K	342	360
16	5		C6 K	342	360
17	0			360	360
18	10		A7 K	324	360
19	10		B3 K	324	360
20	10		C6 K	324	360
21	5	A7		324	342
22	5	B3		324	342
23	5	C6		324	342
24	5	B3		342	360
25	5	B3		324	342
26	5	B3		324	342
27	5		B3 K	324	342
28	5	B4		324	342
29	5	B3		324	342
30	0			350	350
31	4,86	B3		333	350

Taulukko 3. Laastin testausohjelma

No	Tunnus	Tuhka%	UFFA	Sem	Sidea.yht.
1	1	5	B3	427,5	450
2	5	7	B3	418,5	450
3	2	10	B3	405	450
4	6	10	B3	405	450
5	7	12	B3	396	450
6	3	15	B3	382,5	450
7	0	0		450	450
8	0	0		450	450
9	0	0		450	450
10	T	25	B3	337,5	450
11	T	25	B3	337,5	450
12	T	25	B3	337,5	450

4.1.1 Koekappaleet

Vertailubetonin sementti määräksi oli valittu 360 kg/m^2 , josta lisättävä lajitellun lentotuhkan määrä yleensä vähennettiin. Jossain tapauksissa sementtiä vähennettiin enemmän kuin lajiteltua lentotuhkaa lisättiin.

Testeihin valmistetun betonimassan kiviainekset suhteitettiin taulukon 4 mukaisesti.

Taulukko 4. Kiviaines raekokojakauma ja suhteitus

			0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64	H
a	Filleri		14	43	78	96	99	100	100	100	100	100	830
b	Hi0-8		5	12	25	45	66	78	90	100	100	100	621
c	Sepeli 16-32		0	0	0	0	0	1	7	47	100	100	255
yhdistetty a	5,0 %		0,7	2,15	3,9	4,8	4,95	5	5	5	5	5	
b	48,0 %		2,4	5,76	12	21,6	31,68	37,44	43,2	48	48	48	
c	47,0 %		0	0	0	0	0	0,47	3,29	22,09	47	47	
d	0,0 %		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
e	0,0 %		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Yhdistetty runkoaine		3,1	7,91	15,9	26,4	36,63	42,91	51,49	75,09	100	100	459,4

Standardin ja SFS-EN 934-2 Betonin, laastin ja injektointilaastin lisäaineet osa 2 mukaisesti tehdyissä kokeissa sementtimäärä oli 350 kg/m^2 . Myös tässä tapauksessa lisäainemäärä vähennettiin sementistä, vaikka standardi ei sitä vaadikaan. Kiviaineksen suhteitus käy ilmi taulukosta 5

Taulukko 5. Kiviaineksen suhteitus

			0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	64	H
a	Hi0-4		1,42	16,42	50,25	82,56	96,81	99,87	100	100	100	100	747,33
b	Hi3-8		0	0	0	0	2,1	42,33	98,23	100	100	100	442,66
c	Sepeli 16-32		1	1	1	1	1	1	9,3	89	100	100	304,3
yhdistetty a	39,0 %		0,6	6,4	19,6	32,2	37,8	38,9	39,0	39,0	39,0	39,0	
b	15,0 %		0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	6,3	14,7	15,0	15,0	15,0	
c	46,0 %		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	4,3	40,9	46,0	46,0	
d	0,0 %		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
e	0,0 %		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	Yhdistetty runko		1,0	6,9	20,1	32,7	38,5	45,8	58,0	94,9	100,0	100,0	497,8

Betonin koemassojen numerosta 25. alkaen käytettiin kuivattuja hiekkoja, ja tästä syystä kiviaineksen rakeisuuskäyrä muuttui taulukon 5 mukaiseksi.

Betonin valmistus aloitettiin punnitsemalla osa-aineet astioihin, jonka jälkeen ne tyhjennettiin tasosekoittimeen. Ensimmäin sekoitettiin keskenään hiekat ja sideaineet, jonka jälkeen lisättiin vesi. Hiekassa oleva kosteus mitattiin joka aamu ennen kokeiden aloittamista ja näin saatiin annosvesi määriteltä. Kosteus mitattiin kuumentamalla hiekkaa $+105 \text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa ja punnitsemalla sitä ennen ja jälkeen lämmityksen. Painon laskun pysähtyttyä laskettiin pai-

noerosta kosteusprosentti. Notkistin lisättiin, kun massa oli kostunut tasaisesti. Notkistimen sekaan oli sekoitettu osa annosvettä, jotta varmistettiin sen tasainen sekoittuminen betonimassaan. Tämän jälkeen sekoitusta jatkettiin vielä pari minuuttia, jolloin notkistimen vaikutus tuli selkeästi esiin. Notkistimena käytettiin Semtu Oy:n Sem[®] Flow ELE 20 Polykarboksylaattipohjaista tehonotkistinta. Annostus oli 1 % sideaineen määrästä.

Betonimassan saavutettua homogeenisen koostumuksen se tyhjennettiin pohjaluukun kautta kottikärryihin. Ensin tehtiin tuoremassakoe, tämän jälkeen betonista valettiin koekappaleet puristuslujuuskoetta varten. Muottien koko oli 100x100x100 mm ja niitä tehtiin neljä kappaletta joka erästä (kuva1). Muotit olivat malliltaan umpinaisia, joten niiden huolellinen öljyminen oli tärkeää, jotta koekappaleet irtoaisivat niistä. Muotit täytettiin sullomalla ne huolellisesti täyteen puukapulalla, jonka jälkeen ne tiivistettiin vielä pudotuspöydällä. Koekappalemuotit merkittiin paperilapuilla ja peitettiin sen jälkeen muovilla liian nopean pinnan kuivumisen ehkäisemiseksi. Koekappaleet irrotettiin muoteista seuraavana päivänä paineilmalla pohjassa olevan reiän kautta. Koekappaleita säilytettiin yli RH 95 %:n kosteudessa lämpötilan ollessa + 20 °C umpinaisissa astioissa. Kosteassa säilyttämisen tarkoitus on taata hydrataatioon vaadittavan veden riittävyys betonissa. Osa koekappaleista puristettiin 1, 7, 28 ja 91 vrk:n ikäisinä, mutta koska 1 vrk:n tulos oli jo odotetusti aina heikompi, luovuttiin siitä loppuvaiheessa.



Kuva 1. Koekappalemuotti. Kuva Tuomo Paavola.

4.1.2 Laastikokeet

Standardin SFS-EN 450-1 + A1 Fly ash for concrete. part 1 mukaisesti tehdyissä kokeissa koemassa oli betonin sijaan laastia. Se eroaa betonista lähinnä raekokonsa puolesta. Tästä johtuen sementtimäärä on suurempi kuin mitä se on betonissa. Resepti sisältää 450 g sementtiä, 1 350g standardihiekkaa ja 225 g vettä. Testi suoritettiin SFS-EN 196-1:n mukaisesti. Koemassassa osa sementistä (112,5 g eli 25 %) korvattiin lajitellulla lehtotuhkalla. Standardihiekan rakeisuus käy ilmi taulukosta 5. Osa kokeista tehtiin eri UFFA määrillä, jolloin sementin korvausaste vaihteli 5 % -15 %.

Taulukko 6. Standardihiekan rakeisuus

Seula koko mm	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Läpäisy %	100	91	67	33	13	2

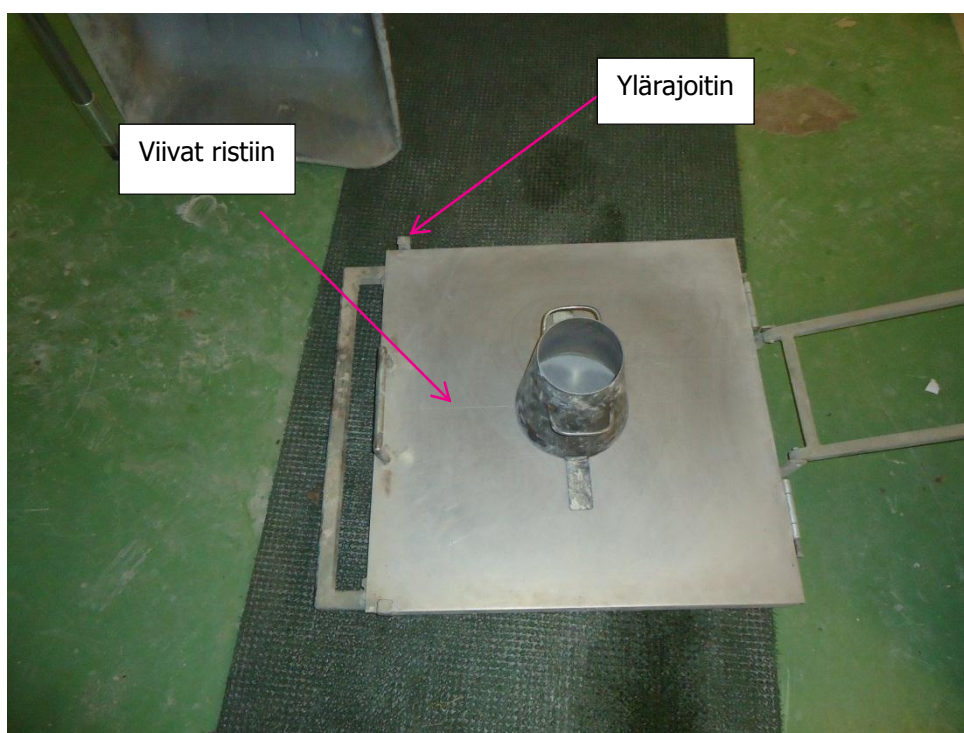
Laasti sekoitettiin standardista poiketen porakonevispilällä huolellisesti 3 minuutin ajan. Tämän jälkeen laastilla valettiin muotteihin kolme koekappaletta sekä vertailu- että koemassoista. Laastikokeissa käytetään ns. prismamuottia, muotin koko n 40 mm x 40 mm x 160 mm (kuva 2). Tärytys tehtiin pudotuspöydällä yhden minuutin ajan, jonka jälkeen muotien pinnat tasattiin ja päälle asetettiin muovi estämään koekappaleiden pinnan kuivuminen. Muotit purettiin seuraavana päivänä ja merkittiin huolellisesti juoksevilla numeroinnilla. Koekappaleita säilytettiin RH 95 %:n kosteudessa lämpötilan ollessa + 20 °C umpinaisissa astioissa. Koekappaleista osa puristettiin 7, 28 ja 91 vrk ikäisenä. Massojen sementtimäärät, korvattu sementtimäärä, leviämä ja puristuslujuustiedot kirjattiin taulukkolaskentaohjelmaan.



Kuva 2. Prismamuotti. Kuva Tuomo Paavola.

4.2 Tuoreen betonin kokeet

Tuoreen betonin testauksella on tarkoitus selvittää betonin työstettävyyssominaisuuksia. Tämä selvitetään yleensä painuma- tai leviämäkokeella, jolla selviää betonin notkeus. Tässä koesarjassa valittiin kokeeksi standardin SFS-EN 12350-5 mukainen leviämäko. Leviämän mitataan täyttämällä tarkoituksenmukainen kartio betonimassalla kahdessa vaiheessa (kuva 3). Ensi kartio täytetään puolilleen ja survotaan tiiviiksi, jonka jälkeen se täytetään kokonaan ja toistetaan toimenpide uudelleen. Lopuksi betoninpinta tasataan kartion reunojen mukaan tasaiseksi. Tämän jälkeen kartio nostetaan varovasti ylös niin, että betoninen kartio ei häiriinny. Tämä kaikki on tehty leviämäpöydän päällä, jolla on mahdollista suorittaa kokeen toinen osa eli pudotus. Pöytää nostetaan varovasti ylärajoitinta vasten ja annetaan sen pudota vapaasti alas ja tämä toistetaan 15 kertaa. Kokeen tulos saadaan mittaamalla leviämän halkaisija kahdesta kohtaa, jotka ovat merkitty pöytään ja laskemalla niiden keskiarvo. Tulos merkittiin taulukkolaskentaohjelmaan 0,5 cm tarkkuudella.



Kuva 3. Leviämäpöytä ja kartio. Kuva Tuomo Paavola.

4.3 Kovettuneen betonin ja laastin kokeet

Betonin koekappaleista testattiin puristuslujuus standardin SFS-EN 12390-3 mukaisesti. Jokaisesta koemassasta valettiin neljä koekappaletta, joista puristuslujuus testattiin 1, 7, 28 ja 91 vrk:n ikäisenä. Puristuslujuudet mitattiin Savonia AMK:n betonilaboratoriossa Toni Technik betoninkoestus laitteella. Laitteen kalibroi Valtion teknillinen tutkimuslaitos vuosittain.

Ennen koestusta koekappale punnittiin ja mitattiin. Näitä tietoja tarvittiin tiheyden ja puristuspinta-alan määrittämiseen. Koestuslaite näyttää maksimi voiman (kN), jolla koekappale murskaantuu. Tästä arvosta voidaan laskea kaavan 1. mukaan puristuslujuus (MPa). Laastikokeissa käytettiin standardin SFS-EN 196-1 mukaista puristuslujuustestausta koekappaleille

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Kaava 1

jossa

f_c = puristuslujuus

F = kuorma murtohetkellä

A_c = kuormitettu pinta-ala

5 KOETULOKSET

5.1 Tuoreen betonin tulokset

Tuoreen betonin tulokset on esitetty taulukossa 7. Leviämän lisäksi myös betonin tehollinen vesimäärä on näkyvissä, jotta osassa tuloksia ilmenevät erot on helpompi ymmärtää. Myös kokonaisvesimäärän hallinnan vaikeus voidaan havaita tuloksista. Tummennetut arvot ovat vertailubetonin arvoja. Numerot 1–29 ovat omia koemassoja ja numerot 30 ja 31 ovat standardin SFS-EN 934-2 mukaisia koemassoja.

Taulukko 7. Leviämä

No	Lev.	Vesi
1	32,5	165
2	48,5	160
3	49,5	160
4	48,5	160
5	48,5	160
6	52	160
7	40	160
8	41	163
9	47,5	163
10	46	163
11	46,5	163
12	49	163
13	43	163
14	34,5	163
15	33,5	163
16	31,5	163
17	30	163
18	44,5	163
19	44	163
20	48	163
21	48	157
22	54,5	157
23	52	157
24	67	157
25	65	157
26	47,5	142
27	56	147
28	57	147
29	56,5	147
30	36	170
31	36	161,5

5.2 Kovettuneen betonin tulokset

Kovettuneen betonin puristuslujuustulokset on esitetty taulukossa 8. Tulokset on esitetty kN-arvona.

Taulukko 8. Puristuslujuus 100 mm kuutio kN-arvona.

No	Tuhka%	UFFA	Karkea	Sementti	Sidea.yht.	1 d	7 d	28 d	91 d
1	0			360	360	300	475	535	671
2	3	A7		342	352,8	275	480	570	722
3	3	A5		342	352,8	270	485	605	730
4	3	C6		342	352,8	265	490	545	705
5	3	C1		342	352,8	265	490	605	704
6	3	B3		342	352,8	245	475	545	705
7	3	B4		342	352,8	265	495	565	716
8	10	A7		324	360	270	470	575	
9	10	B3		324	360	275	495	615	
10	10	C6		324	360	285	475	635	
11	3		A7 K	342	352,8	285	455	560	705
12	3		B3 K	342	352,8	295	465	555	704
13	3		C6 K	342	352,8	310	455	570	724
14	5		A7 K	342	360	310	470	525	710
15	5		B3 K	342	360	300	455	560	682
16	5		C6 K	342	360	295	460	535	719
17	0			360	360	330	485	530	674
18	10		A7 K	324	360	285	465	530	737
19	10		B3 K	324	360	280	480	535	739
20	10		C6 K	324	360	270	480	520	740
21	5	A7		324	342	340	495	570	730
22	5	B3		324	342	335	540	565	736
23	5	C6		324	342	330	530	585	743
24	5	B3		342	360		470	689	829
25	5	B3		324	342		445	622	746
26	5	B3		324	342		490	644	809
27	5		B3 K	324	342		450	637	764
28	5	B4		324	342		450	652	771
29	5	B3		324	342		455	631	739
30	0			350	350			449	
31	4,86	B3		333	350			536	

Koska betonin puristuslujuusluokat perustuvat 150 mm:n kuutiolujuuteen, on taulukkoon 9. muuntokertoimella 0,95 sekä pinta-alaan kaavan 1. mukaisesti laskettu MPa-arvo.

Taulukko 9. Puristuslujuus arvot 150 mm kuution mukaisesti MPa-arvona

No	1 d	7 d	28 d	91 d
1	28,5	45,1	50,8	63,7
2	26,1	45,6	54,2	68,6
3	25,7	46,1	57,5	69,4
4	25,2	46,6	51,8	67,0
5	25,2	46,6	57,5	66,9
6	23,3	45,1	51,8	67,0
7	25,2	47,0	53,7	68,0
8	25,7	44,7	54,6	
9	26,1	47,0	58,4	
10	27,1	45,1	60,3	
11	27,1	43,2	53,2	67,0
12	28,0	44,2	52,7	66,9
13	29,5	43,2	54,2	68,8
14	29,5	44,7	49,9	67,5
15	28,5	43,2	53,2	64,8
16	28,0	43,7	50,8	68,3
17	31,4	46,1	50,4	64,0
18	27,1	44,2	50,4	70,0
19	26,6	45,6	50,8	70,2
20	25,7	45,6	49,4	70,3
21	32,3	47,0	54,2	69,4
22	31,8	51,3	53,7	69,9
23	31,4	50,4	55,6	70,6
24		44,7	65,5	78,8
25		42,3	59,1	70,9
26		46,6	61,2	76,9
27		42,8	60,5	72,6
28		42,8	61,9	73,2
29		43,2	59,9	70,2
30			42,7	
31			50,9	

5.3 Kovettuneen laastin tulokset

Koekappaleprismat puristettiin muuten standardin SFS-EN 450-1 + A1 mukaisesti, mutta koestuslaite ei vastannut kaikilta osin ohjeita. Syy oli, ettei sopivaa laitetta ollut saatavilla. Puristuspinta-ala oli ohjeiden mukaisesti 40 mm x 40 mm kuten myös koestusnopeus 2400 N/s. Puristaminen suoritettiin Savonia AMK:n puulaboratorion TiraTest materiaalienkoestuslaitteella. Puristuspintana toimi kaksi 20 mm teräksestä leikattua neliötä, jotka kohdistettiin prisman päihin käsin. Tämän jälkeen kone hoiti puristamisen ja tuloksen ilmoituksen 1 N:n tarkkuudella, josta se muutettiin kaavan 2. mukaan MPa-arvoksi.

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Kaava 2

jossa

R_c = Puristuslujuus megapascalina

F_c = kuorma murtohetkellä, N

1600 on puristuspinta-ala, mm²

Laasteissa korvattu sementtimäärä vaihteli 5–25 %. Massanumerot 7–12 ovat standardi SFS-EN 450-1 + A1 mukaisella korvausasteella tehtyjä. Numeroissa 1–6 puristustulos oli kahden puristuksen keskiarvo ja numeroissa 7–12 se oli keskiarvo kuudesta puristuksesta. Puristuslujuus arvot on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Puristuslujuusarvot (MPa)

No	Tunnus	Tuhka%	UFFA	Sem	Sidea.yht.	7 d	28 d	91 d
1	1	5	B3	427,5	450	49,0	35,4	58,7
2	5	7	B3	418,5	450	51,9	62,0	62,1
3	2	10	B3	405	450	53,6	62,2	68,0
4	6	10	B3	405	450	37,5	60,3	68,9
5	7	12	B3	396	450	50,9	61,5	76,4
6	3	15	B3	382,5	450	48,2	57,4	69,4
7	0	0		450	450		51,8	61,1
8	0	0		450	450		53,6	57,9
9	0	0		450	450		55,6	56,6
10	T	25	B3	337,5	450		55,5	61,1
11	T	25	B3	337,5	450		57,2	66,6
12	T	25	B3	337,5	450		58,0	69,3

6 KOETULOSTEN ARVIOINTI JA HAVAINNOT

Koetuloksista voidaan selvästi havaita lajitellun lentotuhkan vaikutukset betonin ominaisuuksiin. Tuoremassakokeissa leviämä yleensä parani ja myöhemmät puristuslujuudet kasvoivat. Vaihtelua ilmeni molemmissa seuratuissa ominaisuuksissa, mutta pääsääntöisesti tulokset antoivat ymmärtää lajitellun lentotuhkan ja varsinkin UFFA:n parantavan näitä betonin ominaisuuksia. Myös karkeampi lajite toi betoniin kaivattua työstettävyyttä lujuuden siitä kärsimättä. Tuhkien alkuperällä ei näyttänyt olevan vaikutusta saatuihin tuloksiin. Saman leviämisen saaminen kaikkiin massoihin olisi ollut optimi tilanne, jolloin erot puristuslujuudessa olisivat olleet yksiselitteisiä. Se osoittautui vaikeaksi, sillä betonimassoista ei tahtonut saada samaa leviämää samoilla resepteillä eri päivinä, johtuen hiekoissa olevasta kosteuden vaihtelusta. Koska hiekka- ja sorakasat olivat ulkona ja vaikka niiden päällä olivat pressut, ei veden määrästä voinut saada kohtuullisin menetelmin varmuutta kaikkien erien kohdalla. Tältä ainakin vaikutti, kun tarkastelee massojen lujuuden kehitystä ja vertaa sitä leviämään. Samalla vesimäärällä leviämä oli eri, mutta lujuuden kehityksestä pystyi pääättelemään jonkin verran v/s suhteen vaihtelua.

Kun verrataan koemassojen leviämää ja puristuslujuuksia vertailumassaan, huomataan, että sementtiä on voinut vähentää 10 % ja korvata vain puolet, niin on saavutettu jopa parempi leviämä ja puristuslujuus. Betonimassa numeroa 25 verratessa vertailumassaan on leviämisen ero jo merkittävä ja myös puristuslujuus huomattavasti parempi. Vaihtelua tuloksissa oli jonkin verran ja se voi osaksi selittyä liian pienellä koekappaleiden määrällä. Betonin testauksessa on tarkasteltavan syytä sarjan sisältää riittävä määrä puristuslujuus tuloksia samaa vuorokautta kohden. Tämä sen takia, että saataisiin riittävän edustava otos betonin ominaisuuksista, koska materiaalina betoni ei ole samalla tavalla tasalaatuista kuin vaikka esimerkiksi teräs.

Standardin SFS-EN 934-2 mukaisesti tehdyssä kokeessa ero puristuslujuudessa oli merkittävä. Leviämä oli standardin mukaisesti sama ja veden vähennys 5 %, joka oli vaatimus, jotta ainetta voi kutsua vedentarvetta vähentäväksi lisäaineeksi. Tässä testissä leviämisen saaminen samaksi osoittautui helpoksi. Yksi selittävä tekijä voi olla notkistimen puuttuminen näistä koemassoista. Tästä syystä myös leviämisen saaminen samaksi oli helpompaa, koska vesimäärän vaikutus ei ollut yhtä voimakasta kuin notkistimen kanssa.

Laastikokeissa oli havaittavissa samankaltaisia tuloksia kuin betonikokeissa. Näissä kokeissa oli muutama poikkeus yleisestä linjasta, mutta tulokset ovat silti hyviä, jos vertaa niitä standardin SFS-EN 450-1 + A1 vaatimuksiin. Myös verratessa tuloksia silikan vastavaan standardiin SFS-EN 13263-1, jossa korvattava sementin osuus oli 10 %, ja lujuus

vaatimus 28 vrk iässä 100 %:a vertailulaastiin, olivat tulokset todella hyviä. Äkkiä voisi tehdä sellaisen johtopäätöksen, että UFFA voisi olla silikan täysin korvaava tuote. Tässä tapauksessa on kuitenkin otettava huomioon säilyvyysominaisuudet, joita tässä opinnäytetyössä ei käsitelty. Aiemmissa edellä viitatuissa tutkimuksissa on todettu betonissa ilmenevien mikrohalkeamien vähentyneen, kun käytetään seosaineena lajiteltua lentotuhkaa. Toisin sanoen betoni on tiiviimpää ja näin ollen paremmin rasituksia kestävä. Tämä asia vaatii lisätutkimuksia, jotta lentotuhkan kaikki ominaisuudet saadaan täysimääräisenä betoni- ja rakennusteollisuuden käyttöön.

LÄHTEET

Heikkinen, A. von Konow, T & Fescon Oy. 1992. Betonin mikrosuhteitus Helsinki: Suomen Betonitieto Oy

McCormik, L . 2007 Metakaolin. . [Verkkodokumentti]. Georgia Tech [Viitattu 11.02.2013].
Saatavissa: <http://people.ce.gatech.edu/~kk92/mkgrad.pdf>

SFS-EN 450-1 + A1 Fly ash for concrete. part 1: Definition, specifications and conformity criteria. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 934-2 Betonin, laastin ja injektointilaastin lisäaineet. Osa 2: Betonin lisäaineet. Määritelmät, vaatimukset, vaatimustenmukaisuus ja merkintä. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 196-1 Sementin testausmenetelmät. Osa 1: Lujuuden määrittäminen. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 12350-5 Tuoreen betonin testaus. Osa 5: Leviäminen. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 12390-3 Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 13263-1 Betoniin käytettävä silika. Osa 1: Määritelmät, vaatimukset ja vaatimustenmukaisuus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

Suomen betoniyhdistys ry 1999 Betonitekniikan oppikirja by 201. 4. uudistettu painos. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy

Suomen betoniyhdistys ry 2008 Lentotuhkan käyttö betonissa by 52. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy

Suomalainen sementtikirjanen. [Verkkodokumentti]. Finnsementti [Viitattu 11.02.2013].
Saatavissa:

http://www.finnsementti.fi/files/pdf/FS_Suomalainen_sementti_kirjanen_071112.pdf

Winnefeld, F. 2010 Thermodynamic modeling of calcium sulfoaluminate cements. [Verkkodokumentti]. EMPA [Viitattu 18.02.2013] Saatavissa:
http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/99209